

บทที่ 2

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าและอันตรกิริยากับสสาร

Electromagnetic Radiation and its Interactions with Matter

บทนี้กล่าวถึงรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติพื้นฐาน กลไกของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดอันตรกิริยากับสสาร

คุณสมบัติของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

Properties of Electromagnetic Radiation

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ที่มีการถ่ายโอนพลังงานเมื่อเดินทางผ่านอวกาศ (space) รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นทั้งคลื่น (wave) และอนุภาค (particle)

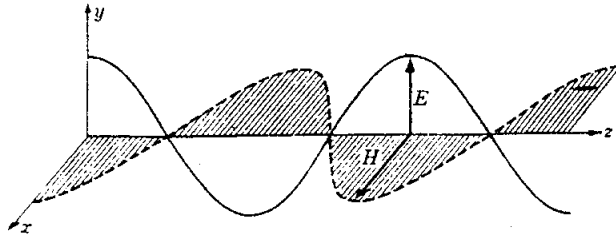
รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปคลื่น Electromagnetic Radiation as Waves

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองของคลื่นแผนเดิม (Classical wave model) ซึ่งใช้พารามิเตอร์เป็นความยาวคลื่น ความถี่ ความเร็วและแอมพลิจูด ปรากฏการณ์การหักเห (refraction) การสะท้อน (reflection) การเสริมสร้างและการหักล้าง (constructive and destructive reinforcement) การกระเจิง (scattering) และการเกิดขั้วหรือโพลาไรเซชัน (polarization) เป็นสมบัติของคลื่น

แบบจำลองของคลื่น ใช้อธิบายการดูดกลืน หรือการเปล่งรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้ ปรากฏการณ์การดูดกลืนหรือการเปล่งรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าต้องใช้สมบัติของอนุภาคที่มีพลังงานแน่นอน เรียกโฟตอน (photon) พลังงานของโฟตอนแปรโดยตรงกับความถี่ของรังสี รังสีจึงมีสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค

คุณสมบัติของคลื่น Wave Properties

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยเส้นแรงแสนามไฟฟ้าที่แกว่งกวัด (oscillate) ในอวกาศกับเส้นแรงแสนามแม่เหล็กที่แกว่งกวัดในอวกาศ โดยสนามทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเขียนแทนได้ดังรูป 2 - 1



รูป 2-1 รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เดียว E แทนเวกเตอร์ไฟฟ้า H แทนเวกเตอร์แม่เหล็ก เวกเตอร์ทั้งสองตั้งฉากกัน

จากรูป 2 - 1 เวกเตอร์ไฟฟ้า (electrical vector) จะอยู่แนวแกนตั้ง เวลาหรือระยะทางอยู่แนวแกนนอน เวกเตอร์แม่เหล็ก (magnetic vector) จะอยู่ในแนวตั้งฉากกับเวกเตอร์ไฟฟ้า และตั้งฉากกับแกนเวลา ขนาดของเวกเตอร์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน เวกเตอร์ไฟฟ้าเท่านั้นที่เกิดอันตรกิริยากับสสาร เกิดปรากฏการณ์การส่งผ่าน (transmission) การสะท้อน การหักเห และการดูดกลืนรังสี

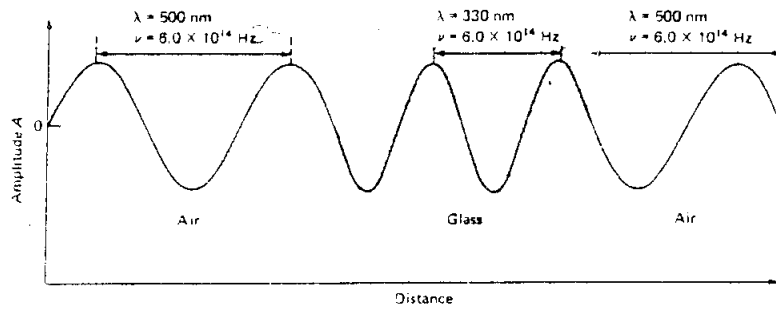
ความยาวคลื่น (wavelength) : λ คือ ระยะห่างระหว่างจุดยอด (จุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุด) ของรังสีสองจุดที่ตรงกัน เวลาที่ใช้ระหว่างสองจุดยอดของคลื่น เรียกคาบ (period) ของรังสี หน่วยที่ใช้เป็น เมตร เซนติเมตร ไมโครเมตร นาโนเมตร อังสตรอม และพิโกเมตร

ความถี่ (frequency) : ν คือ จำนวนของคลื่นสมบูรณ์ที่มีการแกว่งกวัดต่อหน่วยเวลา (วินาที) หรือเท่ากับเศษหนึ่งส่วนคาบ ความถี่หาได้จากแหล่งกำเนิดรังสีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขณะที่รังสีผ่านตัวกลาง หน่วยที่ใช้เป็นไซเคิลต่อวินาที (เฮิรตซ์) หรือเมกะ-เฮิรตซ์

ความเร็วรังสี (velocity of radiation) : v_i เป็นอัตราเร็วของรังสีที่ผ่านตัวกลาง ความเร็วนี้ขึ้นกับตัวกลาง (medium) และความถี่ i แทนตัวกลางที่รังสีเคลื่อนที่หน่วยที่ใช้เป็นเซนติเมตรต่อวินาที

$$v_i = \nu\lambda_i \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

ในตัวกลางสุญญากาศรังสีจะไม่มีอันตรกิริยากับสสาร ความเร็วรังสีจึงไม่ขึ้นกับความถี่และมีค่ามากที่สุด ความเร็วรังสีในสุญญากาศ 2.99792×10^{10} เซนติเมตรต่อวินาที ในตัวกลางอื่นความเร็วรังสีมีค่าน้อยลง เนื่องจากรังสีเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกอะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลาง ความถี่รังสียังคงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง มีเฉพาะความยาวคลื่นเท่านั้นที่ลดลง ดังรูป 2 - 2



รูป 2 - 2 ผลของตัวกลางที่มีต่อรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว (รังสีเอกรงค์)

ในสุญญากาศ $\frac{c}{\eta} = \nu\lambda = 3 \times 10^{10}$ เซนติเมตรต่อวินาที(2.2)

ความเร็วรังสีในอากาศน้อยกว่าสุญญากาศประมาณร้อยละ 0.03 ดรรชนีหักเหของอากาศมีค่า 1.00027 ดังนั้น จึงใช้ค่า 3×10^{10} เซนติเมตรต่อวินาที แทนความเร็วในอากาศได้

เลขคลื่น (wave number) : σ หรือ ν เลขคลื่นที่สัมพันธ์ต่อระยะทาง 1 เซนติเมตร หน่วยที่ใช้เป็นต่อเซนติเมตรหรือเคเซอร์ (Kaser) หรือเลขคลื่นคือเศษหนึ่งส่วนความยาวคลื่น

ตัวอย่าง แสงสีเขียวมีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรในสุญญากาศ จงคำนวณความยาวคลื่น เลขคลื่นของรังสีนี้ในแก้ว $\eta_{อากาศ} 1.00027 \eta_{แก้ว} 1.515$

$$\frac{c}{\eta} = \nu\lambda$$

ในตัวกลางอากาศ

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{3 \times 10^8 \text{ เมตรต่อวินาที}}{1.00027 \times 500 \times 10^{-9} \text{ เมตร}} \\ &= 5.998 \times 10^{14} \text{ เฮิรตซ์} \end{aligned}$$

หรือ $= 6.0 \times 10^{14}$ เฮิรตซ์

ในตัวกลางแก้ว รังสีเดินทางด้วยความถี่เท่าเดิม

$$\begin{aligned} \frac{c}{\eta} &= \nu\lambda \\ \lambda &= \frac{3 \times 10^8 \text{ เมตรต่อวินาที}}{1.515 \times 6.0 \times 10^{14} \text{ เฮิรตซ์}} \end{aligned}$$

$$= 330 \text{ นาโนเมตร}$$

เลขคลื่น $= \frac{1}{\lambda}$

$$= 3.03 \times 10^{-3} \text{ ต่อนาโนเมตร}$$

กำลังรังสีหรือความเข้ม (Radiant power or Intensity) คือ พลังงานของลำรังสีที่ตกสู่พื้นที่ที่กำหนดให้ต่อวินาที ความเข้ม I คือกำลังต่อหน่วยมุมตัน (solid angle) หรือกำลังสองของแอมพลิจูด ความเข้มและกำลังรังสีใช้แทนกันได้แม้จะไม่ถูกต้องนัก

ลักษณะของคลื่น (พิจารณาทางคณิตศาสตร์) เมื่อเวลาเปลี่ยนไปคลื่นจากสมการ 2.1 เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$Y = A \sin(\omega t + \phi) \quad \dots\dots(2.3)$$

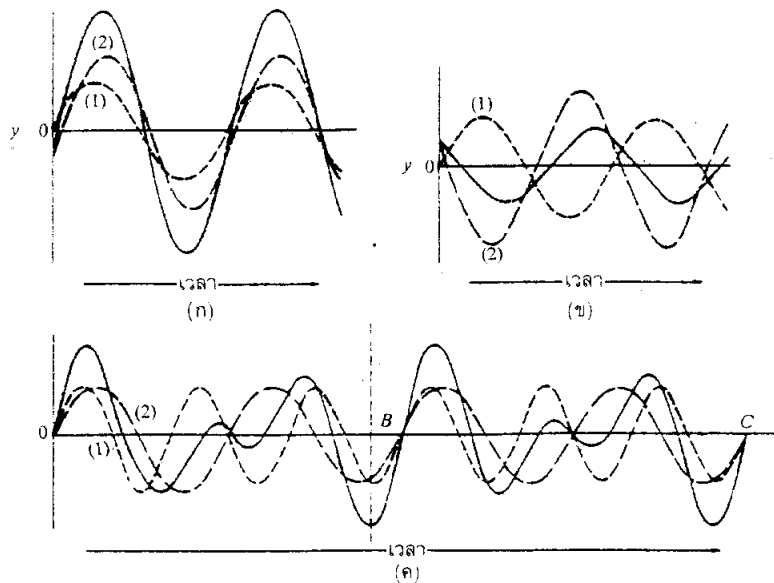
Y สนามไฟฟ้า A แอมพลิจูด หรือมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ Y t เวลา ϕ มุมของเฟส ความเร็วเชิงมุมของเวกเตอร์ ω สัมพันธ์กับความถี่รังสี ν ตามสมการ

$$\omega = 2\pi\nu$$

- เมื่อแทนค่านี้ลงในสมการ 2.3 จะได้

$$Y = A \sin(2\pi\nu t + \phi) \quad \dots\dots(2.4)$$

การทับกันสนิทของคลื่น (superposition of waves) เมื่อคลื่นสองคลื่นหรือมากกว่าสองคลื่นที่มีความยาวคลื่นเท่ากัน และอยู่ในเฟสเดียวกันจะซ้อนทับกันได้ แอมพลิจูดคลื่นที่ได้ออกมาจะมีความสูงเท่ากับแอมพลิจูดของทั้งสองคลื่นรวมกัน แต่ถ้าคลื่นนี้อยู่คนละเฟส จะเกิดการหักล้างกัน คลื่นที่มีความถี่เท่ากันแต่มีแอมพลิจูดและเฟสต่างกัน การทับกันสนิทของคลื่นจะเป็นไปตามสมการ



รูป 2 - 3 การซ้อนทับกันสนิทของคลื่นแบบไซน์

(ก) $A_1 < A_2, (\phi_1 - \phi_2) = -20$ องศา, $\nu_1 = \nu_2$

(ข) $A_1 < A_2, (\phi_1 - \phi_2) = -200$ องศา, $\nu_1 = \nu_2$

(ค) $A_1 = A_2, \phi_1 = \phi_2, \nu_1 = 1.5 \nu_2$

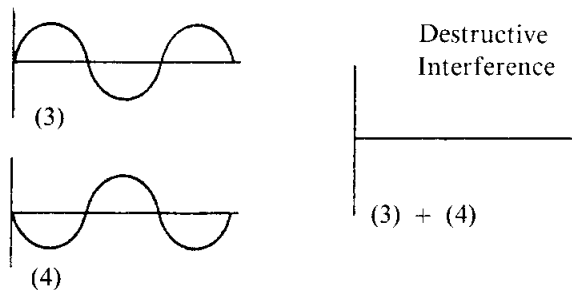
$$Y = A_1 \sin(2\pi vt + \phi_1) + A_2 \sin(2\pi vt + \phi_2) + \dots + A_n \sin(2\pi vt + \phi_n) \dots\dots(2.5)$$

เส้นทึบแทนผลรวมของเส้นประ (1) และ (2)

รูป 2 - 3 (ก) เส้นทึบแสดงผลรวมของคลื่น 1 และ 2 ที่มีมุมที่เฟสต่างกันไม่มาก

รูป 2 - 3 (ข) เส้นทึบแสดงผลรวมของคลื่น 1 และ 2 ที่มีมุมที่เฟสต่างกันมาก

รูป 2 - 3 (ค) เป็นการทับกันสนิทของคลื่นสองคลื่นที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่มีความถี่ (ความยาวคลื่น) ต่างกัน แอมพลิจูดมีค่าสูงสุดเมื่อสองคลื่นอยู่ในเฟสเดียวกัน เฟสต่างกัน $(\phi_1 - \phi_2)$ เป็น 0 หรือ 360 องศา คลื่นจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุด (constructive interference) คลื่นจะเกิดการหักล้างการแทรกสอดมากที่สุด (destructive interference) เมื่อ $(\phi_1 - \phi_2)$ เป็น 180 องศา ดังรูป 2-4

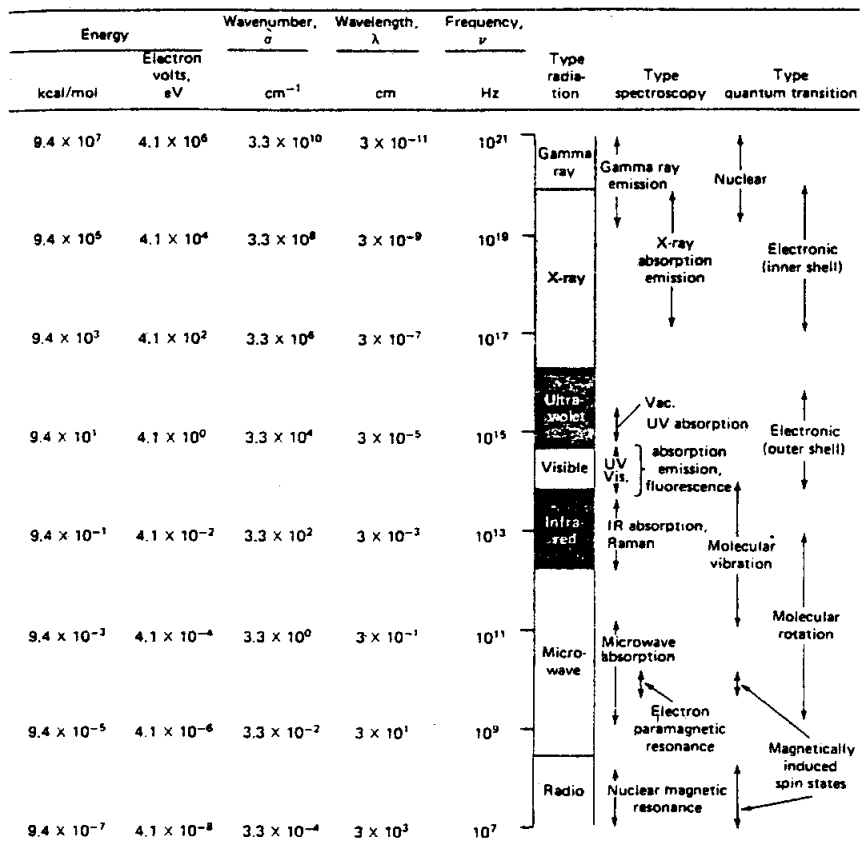


รูป 2 - 4 การหักล้างการแทรกสอดของคลื่น

สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า The Electromagnetic Spectrum

พลังงานของโฟตอนที่ถูกดูดหรือปล่อยออกจากสารตัวอย่างสัมพันธ์กับผลต่างระหว่างสองสถานะของพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของรังสีจึงเขียนในเทอมของความถี่ (เฮิรตซ์) หรือเลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร) และส่วนกลับของความยาวคลื่นต่อเซนติเมตร ต่อไมโครเมตร และต่อนาโนเมตร หน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ใช้อธิบายพลังงานของรังสีเอกซ์และรังสีอัลตราไวโอเล็ต อิเล็กตรอนโวลต์เป็นพลังงานที่ต้องการทำให้อิเล็กตรอนผ่านศักย์ 1 โวลต์ หน่วยกิโลแคลอรีต่อโมล นิยมใช้บอกพลังงานต่อโมลของโฟตอน

สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า รูป 2-5 แสดงช่วงสเปกตรัมและวิธีการที่ใช้วิเคราะห์

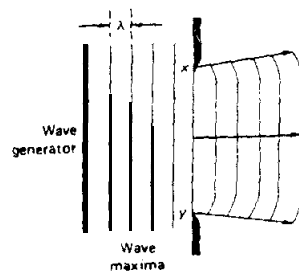


รูป 2-5 คุณสมบัติสเปกตรา การใช้งานและอันตรกิริยาของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

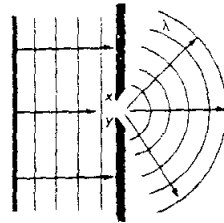
การเลี้ยวเบนของรังสี Diffraction of Radiation

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดแสดงปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน กระบวนการเลี้ยวเบนเกิดเมื่อลำรังสีในแนวขนานผ่านรูหรือช่องเล็กยาว (slit) ที่มีความกว้างพอ ๆ กับความยาวคลื่นของรังสี ถ้ารูหรือช่องเล็กยาวกว้างมากจะไม่พบกระบวนการเลี้ยวเบน ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนดูได้จากห้องปฏิบัติการ ดังรูป 2-6 (ก) ช่องเล็กยาวกว้างมากไม่เกิดการเลี้ยวเบน รูป 2-6 (ข) ช่องเล็กยาวมีความกว้างพอ ๆ กับความยาวคลื่นจะเห็นการเลี้ยวเบน ตรงช่องเล็กยาวจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีใหม่ที่เป็นรูปครึ่งวงกลม (180 องศา) โดยทิศทางของหน้าคลื่นเป็นรูปครึ่งวงกลมหลังจากผ่านช่องเล็กยาวสองอัน

การเลี้ยวเบนเป็นปรากฏการณ์การแทรกสอดเมื่อลำรังสีในแนวขนานผ่านช่องเล็กยาวแคบ A จะเกิดการเลี้ยวเบน ตรงช่องเล็กยาว A จะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีรูปครึ่งวงกลม



(ก)

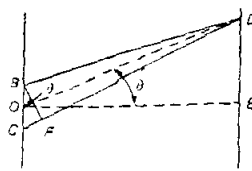
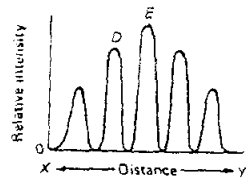
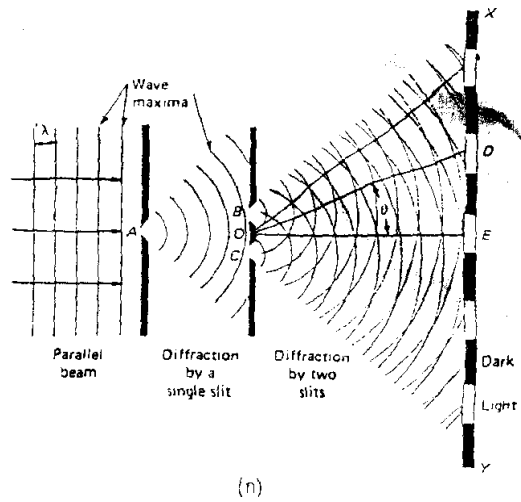


(ข)

รูป 2-6 การแผ่ของคลื่นผ่านช่องแคบยาว (ก) $XY \gg \lambda$, (ข) $XY \cong \lambda$

เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีนี้ผ่านช่องแคบยาว B และ C รังสีที่ออกจากสองช่องแคบยาวนี้ (B และ C) จะไปปรากฏบนฉาก XY ถ้ารังสีที่ใช้มีความยาวคลื่นเดียว จะเห็นภาพมืดและสว่างตั้งฉากกับระนาบของกระดาษ ดังรูป 2-7 (ก) รูป 2-7 (ข) แสดงความเข้มของแถบหลาย ๆ แถบตกลูกศร ถ้าความกว้างช่องแคบยาวและความยาวคลื่นของรังสีมีค่าเท่า ๆ กัน ความเข้มแถบจะลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นจากแถบตรงกลาง ถ้าความกว้างช่องแคบยาวมากความเข้มของแถบรังสียิ่งลดลงมาก แถบตรงกลาง E ซึ่งสว่างที่สุดอยู่ระหว่างกลางของช่องแคบยาว B และ C อธิบายได้โดยใช้ทางเดินแสงรังสี B ถึง E และ C ถึง E ซึ่งมีค่าเท่ากัน ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันของรังสีที่ถูกเลี้ยวเบนจากช่องแคบยาวทั้งสอง

รูป 2-7 (ค) แสดงถึงสภาพที่จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุดและให้แถบสว่างอื่น ๆ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบน θ เป็นมุมที่เกิดจากจุดกลางระหว่างช่องแคบยาว B และ C กับจุดที่แถบสว่างที่สุด ที่ DOE ระยะ BD และ CD แทนทางเดินแสงของช่องแคบยาว B และ C ไปยังจุด D ระยะ OE มีค่ามาก เมื่อเทียบกับระยะห่างของช่องแคบยาว BC ดังนั้น เส้น BD, OD และ CD จึงเกือบขนานกัน เส้น BF ตั้งฉากกับ CD และทำให้เกิดสามเหลี่ยม BCF ซึ่งคล้ายกับสามเหลี่ยม DOE มุม CBF จึงเท่ากับมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน θ จึงเขียนเป็นสมการได้



รูป 2-7 การเลี้ยวเบนของรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวโดยช่องเล็กยาวที่มีความกว้างพอ ๆ กับความยาวคลื่นของรังสี

$$CF = BC \sin \theta$$

BC มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ OE FD มีค่าเกือบเท่ากับ BD CF มีค่าเท่ากับ CD-BD ที่จุด D แหล่งกำเนิดรังสีทั้งสองแทรกสอดกัน (อยู่ในเฟสเดียวกัน) โดย CF มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มของความยาวคลื่นของรังสี (1, 2, 3 และอื่น ๆ)

$$\lambda = CF = BC \sin \theta$$

หรือ
$$n\lambda = BC \sin \theta \quad \dots\dots(2.6)$$

n เป็นตัวเลขเรียกอันดับของการแทรกสอด ระยะ DE ของลำรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนบนฉาก ขึ้นกับระยะ OE และระยะห่างของช่องเล็กยาว BC

$$DE = OD \sin \theta$$

จากสมการ (2.6)

$$n\lambda = BC \sin \theta = BC \cdot \frac{DE}{OD}$$

$$= BC \cdot \frac{DE}{OD} = BC \cdot \frac{DE}{OE} \quad ..(2.7)$$

ตัวอย่าง สมมติว่าฉากในรูป 2-7 ห่างจากช่องเล็กยาว 2.0 เมตร ระยะห่างระหว่างสองช่องเล็กยาว 0.300 มิลลิเมตร จงหาความยาวคลื่นของรังสีที่เห็นแถบที่สี่ที่ระยะ 15.4 มิลลิเมตร จากแถบตรงกลาง

$$\begin{aligned} n\lambda &= BC \cdot \frac{DE}{OE} \\ 4\lambda &= \frac{0.300 \text{ มิลลิเมตร} \times 15.4 \text{ มิลลิเมตร}}{2 \times 1000 \text{ มิลลิเมตร}} \\ \lambda &= 5.78 \times 10^{-4} \text{ มิลลิเมตร} \\ &= 578 \text{ นาโนเมตร} \end{aligned}$$

รังสีอาพันธ์ (Coherent radiation) การเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเมื่อรังสีที่เดินทางออกจากช่องเล็กยาวทั้งสองเกิดการรวมกันเป็นจุดบนจอ รังสีจะเกิดการอาพันธ์กันเมื่อ

1. รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีสองแหล่ง มีความถี่และความยาวคลื่นเท่ากัน
2. ความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างลำรังสีทั้งสองมีค่าคงที่กับเวลา หรือกล่าวได้ว่าคลื่นที่มีต้นกำเนิดจากทุกอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นแหล่งให้คลื่นอยู่ในเฟสเดียวกัน

อันตรกิริยาของรังสีกับสสาร

(The Interaction of Radiation with Matter)

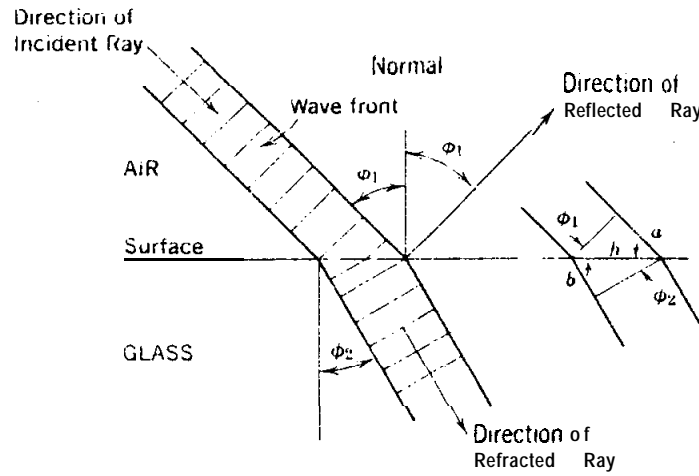
เมื่อรังสีจากสุญญากาศผ่านไปชนผิวของวัสดุ เวกเตอร์ทางไฟฟ้าของรังสีจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมและโมเลกุลของตัวกลาง ปฏิกริยานี้ขึ้นกับคุณสมบัติของตัวกลาง

การส่งผ่านของรังสี (Transmission of Radiation) อัตราเร็วของรังสีที่แผ่ผ่านสารที่โปร่งใสมีค่าน้อยกว่าความเร็วของรังสีในสุญญากาศ อัตราเร็วนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของอะตอม ไอออน หรือโมเลกุลในตัวกลาง

ดรรชนีหักเห (Refractive Index)

การหักเหเป็นกระบวนการที่ไม่มีการดูดกลืนรังสี เมื่อรังสีเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง จะเกิดการสะท้อนบางส่วนและการส่งผ่านบางส่วน รังสีที่ผ่านจากตัวกลางใหม่จะมีความถี่คงเดิม ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่อาจเปลี่ยนไปที่ผิวหน้าของตัวกลางซึ่งมีดรรชนีหักเหต่างกัน เช่น ตัวกลางอากาศกับแก้ว (รูป 2-8) เมื่อมีรังสีแทนด้วยหน้าคลื่น (wave front) ชนที่ผิวหน้าของรอยต่อที่เป็นอากาศ ทำมุม ϕ_1 กับเส้นปกติ โดย ϕ_1 เป็นมุมตก หน้าคลื่นด้านหนึ่งชนผิวแก้ว ส่วนอีกด้านหนึ่งยังคงอยู่ในอากาศ

ด้านที่ชนผิวแก้วจะเกิดการหักเหและให้ลำรังสีออกมาที่มุม ϕ_2 กับเส้นปกติ ที่บริเวณผิวหน้าของรอยต่อทั้งสองจะมีลำรังสีเดิมเดินทางเข้าสู่ผิวแก้ว ส่วนลำรังสีที่เกิดการสะท้อนแทนด้วยมุม ϕ_1 เช่นกัน ดรรชนีหักเหของตัวกลาง (n) คือ อัตราส่วนความเร็วของรังสีในสุญญากาศต่อความเร็วของรังสีในตัวกลางนั้น ดรรชนีหักเหของอากาศมีค่าประมาณ 1 ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00027$)



รูป 2-8 การหักเหของรังสีเมื่อรังสีผ่านจากอากาศไปแก้ว

$$\begin{aligned}
 n_i &= \frac{\text{ความเร็วรังสีในสุญญากาศ}}{\text{ความเร็วรังสีในตัวกลาง}} \\
 &= \frac{c}{v_i} \quad \dots\dots (2.8)
 \end{aligned}$$

c แทนความเร็วรังสีในสุญญากาศ มีค่าพอ ๆ กับความเร็วรังสีในอากาศ v_i ความเร็วรังสีในตัวกลางอากาศ รูป 2-8 เขียนแทนได้ด้วยสามเหลี่ยมมุมฉากสองรูปที่มีด้านร่วมยาว h ระยะทางของหน้าคลื่นด้านหนึ่งที่อยู่จากแก้วมีค่า b กับอีกด้านหนึ่งที่อยู่ในอากาศมีค่า a เวลาที่ใช้ในการเดินทางของระยะทางทั้งสองมีค่าเท่ากัน เมื่อการสั่นของหน้าคลื่นอยู่ในเฟสเดียวกัน

$$\text{baa7} = \frac{\text{ระยะทาง}}{\text{ความเร็ว}}$$

$$\text{ตัวกลางอากาศเวลา} = \frac{a}{c} = \frac{h \sin \phi_1}{c}$$

$$\text{ตัวกลางแก้ว เวลา} = \frac{b}{c/\eta_{แก้ว}} = \frac{h \sin \phi_2}{c/\eta_{แก้ว}}$$

$$\frac{h \sin \phi_1}{c} = \frac{h \sin \phi_2}{c/\eta_{แก้ว}}$$

$$\eta_{แก้ว} = \frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2}$$

หรือ

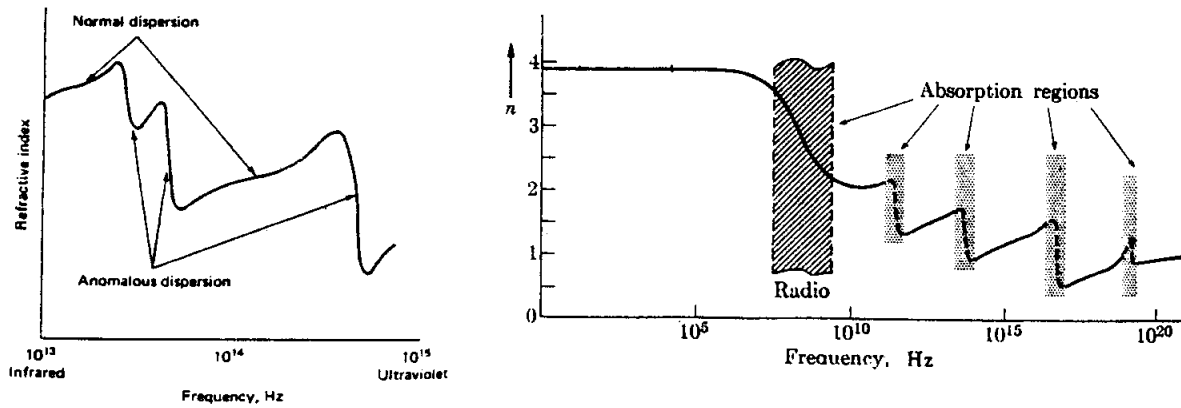
$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\eta_1 \sin \phi_1 = \eta_2 \sin \phi_2 \quad \dots\dots(2.9)$$

สมการนี้เรียกกฎของสเนล (snell's law) 1 และ 2 แทนรังสีที่เดินทางจากตัวกลาง 1 ไปสู่ตัวกลาง 2 ดรรชนีหักเหของตัวกลางใด ๆ หาได้โดยเปรียบเทียบกับสุญญากาศหรืออากาศ

อันตรกิริยาใช้อธิบายกระบวนการการส่งผ่านของรังสี สนามไฟฟ้ากระแสสลับของรังสีทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกของอนุภาคเกิดการสั่นจึงเกิดโพลาไรส์ (การเกิดขั้ว) ของอนุภาคเป็นคาบ (periodic) กระบวนการนี้รังสีไม่ถูกดูดกลืน พลังงานที่ใช้ในการโพลาไรส์จึงปล่อยออกมาจากสารเท่าเดิมหลังจากสารกลับสู่สถานะเดิม กระบวนการนี้จึงไม่มีการเปลี่ยนพลังงาน ความถี่ที่ออกมาจึงไม่เปลี่ยนแปลง แต่อัตราเร็วการแผ่ช้าลงเนื่องจากพลังงานนี้ต้องคงอยู่ระยะหนึ่ง (10^{-14} 10^{-15} วินาที) จึงปล่อยออกมา การส่งผ่านของรังสีผ่านตัวกลางจึงเกิดขึ้นหลายขั้นตอนและมีการสั่นของอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเกิดร่วมด้วย รังสีที่ออกจากอนุภาคที่เกิดการโพลาไรส์ในตัวกลางปล่อยออกมาทุกทิศทาง ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กจะเกิดการหักล้างกันทำให้การแผ่รังสีในทิศทางอื่น ๆ น้อยกว่าทางเดินของลำรังสีเดิม แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ เช่น โมเลกุล พอลิเมอร์ หรือคอลลอยด์ การแทรกสอดแบบหักล้างกันเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ บางส่วนของลำรังสีจึงเกิดการกระเจิง

การกระจาย (dispersion) ความเร็วของรังสีในสสารขึ้นกับความถี่ ดรรชนีหักเหของสสารเปลี่ยนไปเมื่อความถี่เปลี่ยนไป การเปลี่ยนไปของดรรชนีหักเหของสสารเมื่อความถี่หรือความยาวคลื่นเปลี่ยนเรียกว่าการกระจาย



รูป 2-9 เคอร์ฟการกระจาย

รูป 2-9 เป็นเคอร์ฟที่ได้จากการพล็อตค่าดรรชนีหักเหกับความถี่ ช่วงการกระจายปกติ (normal dispersion region) ค่าดรรชนีหักเหเพิ่มขึ้นทีละน้อยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น (ความยาวคลื่นลดลง) ช่วงการกระจายวิปริต (anomalous dispersion region) ค่าดรรชนีหักเหลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ช่วงการกระจายวิปริต มักเกิดเมื่อความถี่ที่สนใจมีค่าเท่ากับความถี่ฮาร์มอนิกตามธรรมชาติ (natural harmonic frequency) ของโมเลกุลอะตอมหรือไอออนที่อยู่ในสสาร ที่ความถี่นี้พลังงานของรังสีถ่ายโอนให้กับสสารและเกิดการดูดกลืนของลำรังสีช่วงนี้ (absorption region)

เคอร์ฟการกระจายใช้ประโยชน์ในการเลือกวัสดุมาทำให้เป็นอุปกรณ์วิเคราะห์แสง สารที่แสดงการกระจายปกติในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจใช้ทำเลนส์ สารเหล่านี้มีค่าดรรชนีหักเหมากและค่อนข้างคงที่ สารที่แสดงการกระจายแบบวิปริตในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจใช้ทำปริซึม ปริซึมที่ใช้ควรมีดรรชนีหักเหน้อยเพื่อลดความคลาดรงค์ (chromatic aberration)

การสะท้อนและการกระเจิงของรังสี

(Reflection and Scattering of Radiation)

เมื่อรังสีชนผิวหน้าตัวกลางที่มีค่าดรรชนีหักเหต่างกันจะมีการสะท้อนเกิดขึ้น ปริมาณรังสีที่เกิดการสะท้อนมีค่ามากขึ้นเมื่อดรรชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองมีดรรชนีหักเหต่าง

กัน เมื่อลำรังสีชนผิวหน้า ปริมาณรังสีที่เกิดการสะท้อนจะมีค่า

$$\frac{I_r}{I_o} = \frac{(\eta_2 - \eta_1)^2}{(\eta_2 + \eta_1)^2} \quad \dots\dots(2.10)$$

I_o ความเข้มของลำรังสีที่ชน I_r ความเข้มของลำรังสีที่สะท้อน η_1 และ η_2 ดรรชนีหักเหของสองตัวกลาง

บริเวณผิวแก้วหรือควอร์ตซ์ที่ขัดมัน การสะท้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมุมตกเพิ่มขึ้นจนถึง 60 องศา เมื่อเกินมุมนี้การสะท้อนเกิดขึ้นมากและมีค่าเกือบร้อยละ 100 ที่มุม 90 องศา ตัวอย่าง จงคำนวณร้อยละของความเข้มรังสีที่ลดลงเนื่องจากการสะท้อนของลำแสงสีเหลืองในแนวตั้งฉากเมื่อผ่านเซลล์แก้วที่มีน้ำอยู่ สมมติว่าแสงสีเหลืองมีค่าดรรชนีหักเหในแก้ว 1.50 น้ำ 1.33 และอากาศ 1.00

ความเข้มรังสีที่ลดลงเนื่องจากการสะท้อนมีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มของรังสีที่สะท้อนแต่ละรอยต่อระหว่างหน้า

สำหรับ ความเข้มรังสีที่ถูกสะท้อนระหว่างหน้าแรก (อากาศไปแก้ว) เขียนได้เป็น

$$\frac{I_{r1}}{I_o} = \frac{(1.50-1.00)^2}{(1.50+1.00)^2} = 0.040$$

$$I_{r1} = 0.040 I_o$$

ความเข้มรังสีที่ชนระหว่างหน้าสองมีค่า $(I_o - 0.040 I_o) = 0.960 I_o$ สำหรับความเข้มรังสีที่ถูกสะท้อนระหว่างหน้าสอง (แก้วไปน้ำ) เขียนได้เป็น

$$\frac{I_{r2}}{0.960 I_o} = \frac{(1.50-1.33)^2}{(1.50+1.33)^2} = 0.0036$$

$$I_{r2} = 0.0035 I_o$$

ความเข้มรังสีที่ชนระหว่างหน้าสามมีค่า $(0.960 I_o - 0.0035 I_o) = 0.957 I_o$ สำหรับความเข้มรังสีที่ถูกสะท้อนระหว่างหน้าสาม (น้ำไปแก้ว) เขียนได้เป็น

$$\frac{I_{r3}}{0.957 I_o} = \frac{(1.50-1.33)^2}{(1.50+1.33)^2} = 0.0036$$

$$I_{r3} = 0.0034 I_o$$

ความเข้มรังสีที่ชนระหว่างหน้าสีมีค่า $(0.957 I_0 - 0.0034 I_0) = 0.954 I_0$ สำหรับความเข้มรังสีที่ถูกสะท้อนระหว่างหน้าสี (แก้วไปอากาศ) เขียนได้เป็น

$$\frac{I_r}{0.954 I_0} = \frac{(1.50 - 1.00)^2}{(1.50 + 1.00)^2} = 0.040$$

$$I_r = 0.038 I_0$$

ความเข้มรังสีที่ลดลงเนื่องจากการสะท้อนมีค่า $= I_r1 + I_r2 + I_r3 + I_r4$

$$I_{rt} = 0.040 I_0 + 0.0035 I_0 + 0.0034 I_0 + 0.038 I_0$$

$$= 0.0849 I_0$$

$$\frac{I_{rt}}{I_{r0}} = 0.0849 \text{ หรือ } 8.5 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

การกระเจิง (Scattering) เมื่อมีรังสีผ่านเข้าไปในสสาร สสารจะรับพลังงานไว้ทำให้เกิดการโพลาไรส์ของไอออน อะตอมหรือโมเลกุลช่วงสั้น ๆ หลังจากเกิดการโพลาไรส์จะมีรังสีออกมาทุกทิศทุกทางแล้วอนุภาคนี้กลับสู่สภาพเดิม อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของรังสี จะเกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดแบบหักล้างกัน จึงไม่ค่อยพบรังสีออกมาจากทิศทางอื่น ยกเว้นลำรังสีที่เดินทางในทิศทางเดิม โดยความเข้มรังสีที่ถูกกระเจิงจะเพิ่ม เมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคปรากฏการณ์นี้เรียก ปรากฏการณ์ทินดอลล์ (Tyndall effect) ทางเดินของลำรังสีจึงไม่เปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเกิดอันตรกิริยา เมื่อรังสีผ่านสาร เช่น อากาศ ที่มีอนุภาคเล็ก ๆ และมีขนาดพอ ๆ กับความยาวคลื่น แสงจะกระเจิงทุกทิศทาง ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมากอยู่มากจะมีแสงสีน้ำเงินกระเจิงมากที่สุด แสงสีแดงกระเจิงน้อย การกระเจิงแบบนี้ได้แก่ สีน้ำเงินในท้องฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียก ปรากฏการณ์เรย์ลี (Rayleigh scattering)

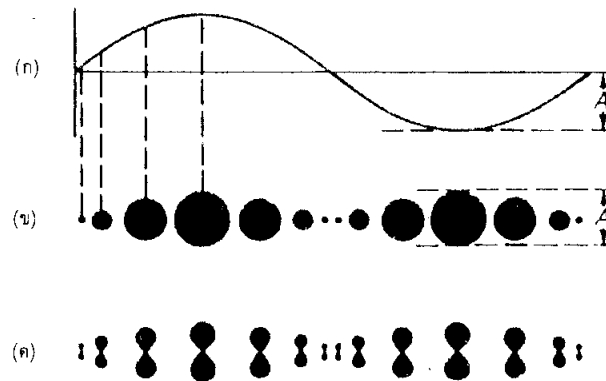
การกระเจิงโดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เช่น คอลลอยด์ สารแขวนลอย หาเหตุผลมาอธิบายยาก ความเข้มที่กระเจิงแบบนี้แปรผกผันกับกำลังสองของความยาวคลื่น $(1/\lambda^2)$ การวัดรังสีที่เกิดการกระเจิงใช้หาขนาดและรูปร่างของพอลิเมอร์ โมเลกุลและอนุภาคคอลลอยด์ ปรากฏการณ์นี้ใช้ในการวิเคราะห์โดยเนฟลิโลเมตรี (Nephelometry)

การกระเจิงเกิดดีเมื่ออนุภาคที่กระเจิงรังสีมีขนาดเท่ากับความยาวคลื่นของรังสีที่ชนอนุภาคที่แพร่อยู่ในตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหต่างกัน

การกระเจิงรามัน (Raman Scattering) ต่างจากการกระเจิงรังสีแบบอื่น ๆ เนื่องจากส่วนหนึ่งของรังสีที่เกิดการกระเจิงจะมีความถี่เปลี่ยนแปลง ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเกิดจากการแทรกนชิชั้นของระดับพลังงานแบบการสั่นในโมเลกุล ภายหลังจากการเกิดการโพลาไรส์

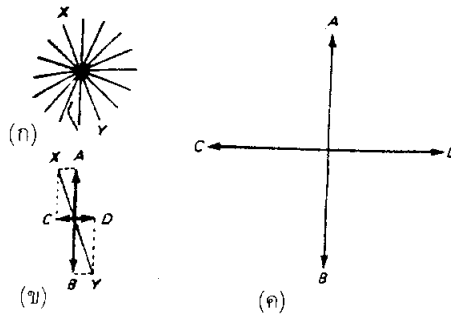
การโพลาไรส์ของรังสี (Polarization of Radiation)

แหล่งกำเนิดรังสีส่วนใหญ่ให้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการแกว่งกวัดของเวกเตอร์ไฟฟ้าและเวกเตอร์แม่เหล็กที่มีแอมพลิจูดเท่ากันออกมาทุกทิศทาง และตั้งฉากกับทิศทางการแจกแจง รังสีแบบนี้เรียกลำรังสีที่ไม่โพลาไรส์ (unpolarized beam) ถ้าดูภาพตามยาวของลำรังสีเอกรงค์จะเห็นว่าไม่มีเวกเตอร์ไฟฟ้าจำนวนมาก เวกเตอร์นี้แกว่งกวัดไปมาและมีขนาดจากศูนย์จนถึงค่าสูงสุด (แอมพลิจูด) รูป 2-10 (ข) แทนเวกเตอร์เหล่านี้ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ



รูป 2-10 รังสีที่ไม่โพลาไรส์และระนาบโพลาไรส์ (ก) ภาพหน้าตัดของลำรังสีเอกรงค์ (ข) ภาพตามยาวของลำรังสีที่มีแอมพลิจูด (ค) และโพลาไรส์ (ค) ภาพตามยาวของลำรังสีที่มีแอมพลิจูด (ค) และโพลาไรส์บนแกนตั้ง

ดังรูป 2-11 (ก) แสดงเวกเตอร์ทางไฟฟ้าของรังสีออ์ดิไนรี ถ้ามีเวกเตอร์ในระนาบหนึ่งแทนด้วย XY แยกเวกเตอร์นี้ออกเป็นสองระนาบตั้งฉากกัน (ระนาบ AB และ CD) ดังรูป 2-11 (ข) ถ้าเปลี่ยนเวกเตอร์ไฟฟ้า XY ให้อยู่ในระนาบ AB และ CD จะได้ดังรูป 2-11 (ค) ถ้าเอาระนาบของการแกว่งกวัดชุดใดชุดหนึ่งออก จะได้ลำรังสีแบบระนาบโพลารไรส์ การแกว่งกวัดของเวกเตอร์ไฟฟ้าของลำรังสีระนาบโพลารไรส์จะมีเพียงระนาบเดียวในอากาศ



รูป 2-11 (ก) แสดงเวกเตอร์ไฟฟ้าของรังสีที่เดินทางตั้งฉากกับกระดาษ
 (ข) แสดงการแยกเวกเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งออกเป็น XY
 (ค) ผลรวมของเวกเตอร์ไฟฟ้าสองระนาบ

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดระนาบโพลารไรส์ผลิตได้จาก

1. อะตอมหรือโมเลกุลเดี่ยว เช่นคลื่นวิทยุที่ปล่อยจากเสาอากาศ รังสีจากอะตอมเดี่ยวหรือโมเลกุลเป็นรังสีระนาบโพลารไรส์ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงแบบนี้มีอนุภาคจำนวนมากในทุกทิศทาง ลำรังสีนี้จึงมีการสั่นเท่ากันทุกทิศทางรอบแกนที่มันเดินทาง

2. ผลึกแอนไอโซทรอปิก (anisotropic crystal) ผลึกนี้จะดูดกลืนรังสีในระนาบ CD และให้รังสีในระนาบ AB ผ่าน

3. แผ่นโพลารอยด์ (polarizing sheet) จะกำจัดรังสีที่ไม่โพลารไรส์ (มีครึ่งหนึ่งของทั้งหมด) ออก ยอมให้รังสีระนาบโพลารไรส์ผ่าน

กลศาสตร์ควอนตัมที่ใช้อธิบายสมบัติของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า Quantum Mechanical properties of Radiation

อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสาร อธิบายได้โดยใช้คุณสมบัติของอนุภาคที่มีพลังงานแน่นอน เรียกโฟตอน (photon) หรือควอนตา (quanta) พลังงานของโฟตอนขึ้นกับความถี่ของรังสี

$$E = h\nu \quad \dots\dots(2.11)$$

h ค่าคงที่ของพลังค์ 6.627×10^{-27} เอิร์กวินาที

$$E = h \frac{c}{\lambda} = hc\bar{\nu}$$

ตัวอย่าง จงคำนวณพลังงานของ (ก) ลำรังสีเอกซ์ 5.3 อังสตรอม (ข) ลำรังสีวิสิเบิล 530 นาโนเมตร

ก. พลังงานของรังสีเอกซ์นิยมใช้หน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ หน่วยนี้คือพลังงานที่ใช้เพื่อเร่งอิเล็กตรอนผ่านศักย์ 1 โวลต์ การคำนวณนี้ต้องเปลี่ยนหน่วยเอิร์กวินาทีเป็นอิเล็กตรอนโวลต์วินาที โดยการคูณด้วย 6.2×10^{11}

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad E &= h\nu \\ &= \frac{6.6 \times 10^{-27} \times 6.2 \times 10^{11} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์วินาที} \times 3.0 \times 10^{10}}{5.3 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}} \end{aligned}$$

$$\text{เซนติเมตรต่อวินาที} = 2.3 \times 10^3 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$\begin{aligned} F &= h\nu \\ &= \frac{6.6 \times 10^{-27} \text{ เอิร์กวินาที} \times 3.0 \times 10^{10} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}}{530 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}} \\ &= 3.74 \times 10^{-12} \text{ เอิร์ก} \end{aligned}$$

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) แบบจำลองของอนุภาคใช้อธิบายความประพฤติของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเมื่อรังสีที่มีพลังงานเพียงพอชนผิวโลหะ อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะจะหลุดออกมา แล้วรังสีที่ชนมีพลังงานเป็นศูนย์ พลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาสัมพันธ์กับความถี่ของรังสีที่ชน และเขียนเป็นสมการได้

$$E = h\nu - W \quad \dots\dots(2.12)$$

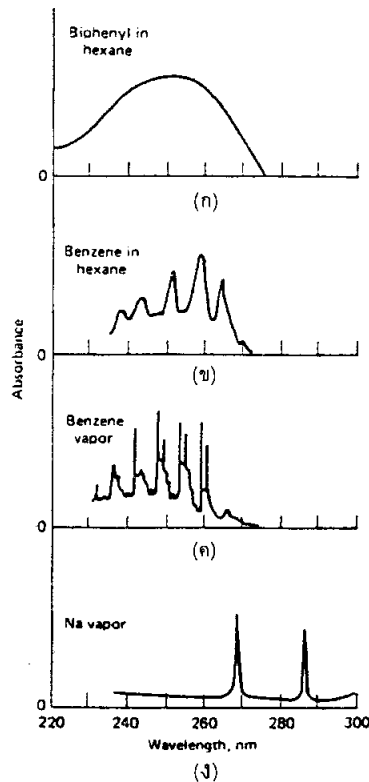
W = งานที่ใช้เพื่อดึงอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะให้ออกไปสู่สุญญากาศ ขึ้นอยู่กับความถี่ แต่ไม่ขึ้นกับความเข้มของลำรังสี จริง ๆ แล้วความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้นทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มขึ้น

งานที่ต้องใช้ให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาขึ้นกับสมบัติของโลหะ โลหะแอลคาไลน์ใช้งานที่มีค่าน้อย ดังนั้น รังสีวิสิเบิลจึงมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนบริเวณผิวหลุดออกมา โลหะที่อยู่ทางขวามือของโลหะแอลคาไลน์ต้องใช้งานที่มีค่ามากจึงต้องใช้รังสีที่มีความยาวคลื่นต่ำ (อัลตราไวโอเล็ต)

การดูดกลืนรังสี (Absorption of Radiation)

เมื่อรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางโปร่งใสที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ความถี่ของรังสีบางค่าจะถูกเอาออกโดยกระบวนการดูดกลืน รังสีแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอม หรือโมเลกุลที่อยู่ในสารตัวอย่างซึ่งอยู่ที่สถานะที่มีพลังงานต่ำ (สถานะพื้น) เปลี่ยนไปสู่สถานะที่มีพลังงานสูง (สถานะกระตุ้น) ที่อุณหภูมิห้อง อะตอม หรือโมเลกุลส่วนใหญ่อยู่ที่สถานะพื้น

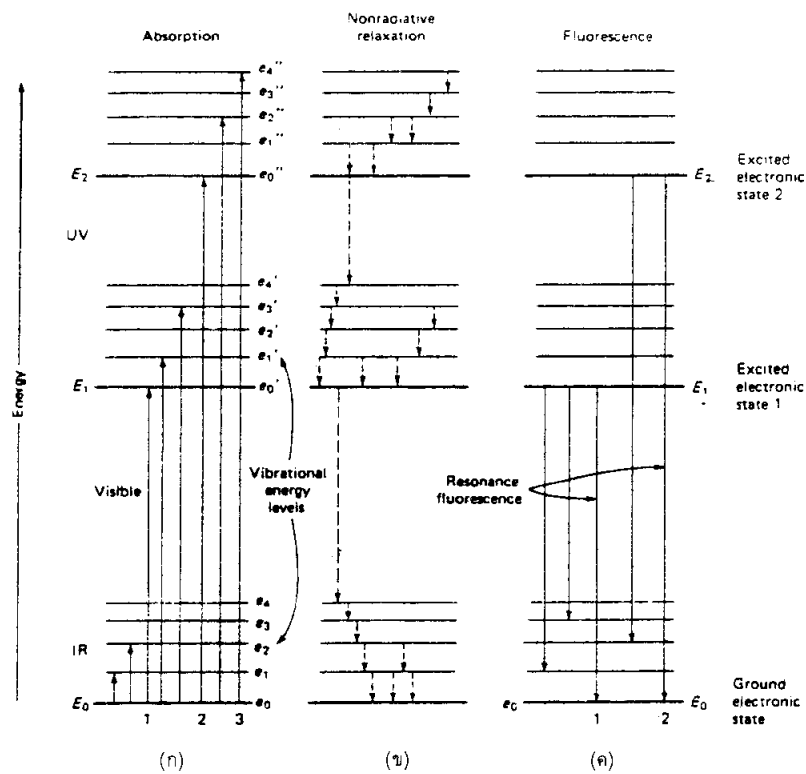
อะตอม ไอออน หรือโมเลกุลที่มีระดับพลังงานแน่นอนเมื่อมีการดูดกลืนรังสี พลังงานของโฟตอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานที่สถานะกระตุ้นและสถานะพื้น การศึกษาความถี่รังสีที่ถูกดูดกลืนจะบอกลักษณะขององค์ประกอบที่มีในสารตัวอย่าง เคอร์ฟที่ได้จากการพล็อตความดูดกลืนกับความยาวคลื่นหรือความถี่ เรียกสเปกตราดูดกลืน (absorption spectra) สเปกตราดูดกลืนขึ้นกับความเข้มข้น สภาพแวดล้อม และคุณสมบัติทางกายภาพของสปีชีส์ที่ดูดกลืน (absorbing species)



รูป 2-12 สเปกตราดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารบางชนิด

การดูดกลืนโดยอะตอม (Atomic Absorption) เมื่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือวิสิเบิล ที่มีหลายความยาวคลื่นผ่านตัวกลางที่มีอนุภาคเป็นพวกอะตอมเดี่ยว เช่น ไอปรอทหรือโซเดียม จะเกิดการดูดกลืนรังสีเฉพาะความถี่ ดังรูป 2-12 (ง) อะตอมจะถูกกระตุ้นโดยกระบวนการอิเล็กตรอนิกส์ อิเล็กตรอนหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัวรับพลังงานและกระโดดไปสู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้น โซเดียมมีการเปลี่ยนสถานะจาก 3s ไป 3p โดยใช้พลังงานที่ตรงกับเลขคลื่น 1.697×10^4 ต่อเซนติเมตร จึงให้พีคดูดกลืนที่มีความยาวคลื่น 589.3 นาโนเมตร ส่วนพีคดูดกลืนอื่น ๆ จะเกิดการกระตุ้นที่สถานะอื่น

รังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแทนที่ชั้นของอิเล็กตรอนวงนอกสุดหรืออิเล็กตรอนที่เกิดพันธะ รังสีเอกซ์มีพลังงานมากจึงเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่วงในสุด (ใกล้นิวเคลียสของอะตอม) พีคดูดกลืนในบริเวณรังสีเอกซ์จึงเกิดจากอิเล็กตรอนิกแทนที่ชั้นของอิเล็กตรอนวงในสุด



รูป 2-13 ระดับพลังงานย่อย ๆ ของโมเลกุลอินทรีย์ที่ให้การวาวแสง (ฟลูออเรสเซนซ์)

การดูดกลืนของโมเลกุล (Molecular Absorption) การดูดกลืนแสงของโมเลกุลที่มีหลายอะตอมจะซับซ้อนกว่าเนื่องจากโมเลกุลมีสถานะของพลังงานมาก พลังงานรวมของโมเลกุลมีค่า

$$E_{\text{โมเลกุล}} = E_{\text{อิเล็กตรอนิกส์}} + E_{\text{การสั่น}} + E_{\text{การหมุน}} \quad \dots\dots(2.13)$$

$E_{\text{อิเล็กตรอนิกส์}}$ แทนพลังงานทางไฟฟ้าของโมเลกุล $E_{\text{การสั่น}}$ แทนพลังงานของโมเลกุลที่อะตอมต่าง ๆ เกิดการสั่น $E_{\text{การหมุน}}$ แทนพลังงานการหมุนของโมเลกุลรอบจุดศูนย์กลางของแรงศูนย์ถ่วง จำนวนระดับพลังงานของโมเลกุลจึงมีมากกว่าอะตอมมาก

รูป 2-13 เคอร์ฟแสดงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับสถานะอิเล็กตรอนิกส์ และสถานะการสั่นของโมเลกุล เส้นหนา E_1 และ E_2 แทนพลังงานของสถานะกระตุ้นอิเล็กตรอนิกส์สองระดับพลังงานของการสั่น (e_0, e_1, \dots, e_n) ในแต่ละสถานะอิเล็กตรอนิกส์ ผลต่างของพลังงานระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นมีค่ามากกว่าผลต่างของพลังงานระหว่างระดับการสั่น

รูป 2-13 (ก) ลูกศรในรูปแสดงการแทนที่ชั้นที่เกิดจากการดูดกลืนของรังสี ความถี่ของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนเนื่องจากการแทนที่ชั้นจาก E_0 ไป E_1 (ตรงกับรังสีวิลบีล)

$$\nu_{11} = \frac{1}{h} (E_1 + e''_{11} - E_0) \quad \dots\dots(2.14)$$

ความถี่ของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนเนื่องจากการแทนที่ชั้นจาก E_0 ไป E_2 (ตรงกับรังสีช่วงอัลตราไวโอเล็ต)

$$\nu_{21} = \frac{1}{h} (E_2 + e''_{21} - E_0) \quad \dots\dots(2.15)$$

ความถี่ของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนเนื่องจากการแทนที่ชั้นจาก e_0 ไป e_n (ตรงกับรังสีช่วงอินฟราเรด)

$$\nu = \frac{1}{h} (e_n - e_0) \quad \dots\dots(2.16)$$

แต่ละระดับพลังงานการสั่นจะมีระดับพลังงานการหมุน ผลต่างของระดับพลังงานการหมุนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับผลต่างของระดับพลังงานการสั่น ผลต่างของพลังงานการหมุนตรงกับรังสีไมโครเวฟ (คลื่นจุลภาค) และไกลอินฟราเรด หรือช่วงความยาวคลื่น 0.01 ถึง 2.0 เซนติเมตร

สเปกตราดูดกลืนของอะตอมและโมเลกุลเกิดจากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ การดูดกลืนเนื่องจากอะตอมจะเห็นเป็นเส้นชัดเจน การดูดกลืนเนื่องจากโมเลกุลเส้นดูดกลืนมีมากและเส้นที่อยู่ใกล้กันอาจเกิดการรวมกัน (สถานะทางไฟฟ้ามีหลายระดับการสั่น สถานะการสั่นมีหลายระดับการหมุน) สเปกตราดูดกลืนของโมเลกุล เช่น ไอobenซีน รูป 2-12 (ค) จะเห็นเป็นแถบดูดกลืน ถ้าโมเลกุลอยู่ในตัวทำละลาย แถบดูดกลืนจะกว้างกว่าปกติ ดังรูป 2-12 (ก) และ (ข)

การดูดกลืนเนื่องจากการสั่นเพียงอย่างเดียวพบในช่วงอินฟราเรด พลังงานช่วงนี้ต่ำจึงไม่เกิดการแทรกชั้นทางอิเล็กทรอนิกส์ สเปกตราก็ได้จึงแคบ แต่ละระดับการสั่นจะมีระดับการหมุนอยู่ด้วยจึงให้กลุ่มพีคปนเนื่องจากระดับการหมุนทำให้พีคที่ได้กว้าง สารตัวอย่างที่เป็นของเหลวหรือของแข็งการหมุนเกิดขึ้นยาก หมูพีคเหล่านี้จึงไม่ปรากฏ สเปกตราก็ได้จะแคบ สเปกตรากการหมุนเพียงอย่างเดียวพบในสารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส

การดูดกลืนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็ก (Absorption Induced by a Magnetic Field) อิเล็กตรอนหรือนิวคลีไอของธาตุที่มีสมบัติแม่เหล็กและอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงจะมีระดับพลังงานแน่นอน ผลต่างของพลังงานที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กมีค่าน้อย การแทรกชั้นระหว่างสถานะนี้เกิดจากการดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นมาก (ความถี่ต่ำ) นิวคลีไอจะดูดกลืนคลื่นวิทยุช่วงความถี่ 30 ถึง 500 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนอิเล็กตรอนดูดกลืนคลื่นวิทยุที่มีความถี่มาก หรือประมาณ 9,500 เมกะเฮิร์ตซ์หรือคลื่นไมโครเวฟ นิวคลีไอหรืออิเล็กตรอนที่ดูดกลืนสนามแม่เหล็กศึกษาจากวิธีการทางนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ และอิเล็กตรอนสปีนเรโซแนนซ์

กระบวนการผ่อนคลาย (Relaxation Process) ช่วงชีวิตของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นมีค่าน้อย อะตอมหรือโมเลกุลนี้จะเกิดกระบวนการผ่อนคลายแล้วกลับสู่สถานะพื้น การผ่อนคลายเป็นกระบวนการไม่ให้รังสีแต่มีขั้นตอนต่าง ๆ เกิดขึ้นมาก พลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์โดยการชนกับโมเลกุลอื่นทำให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

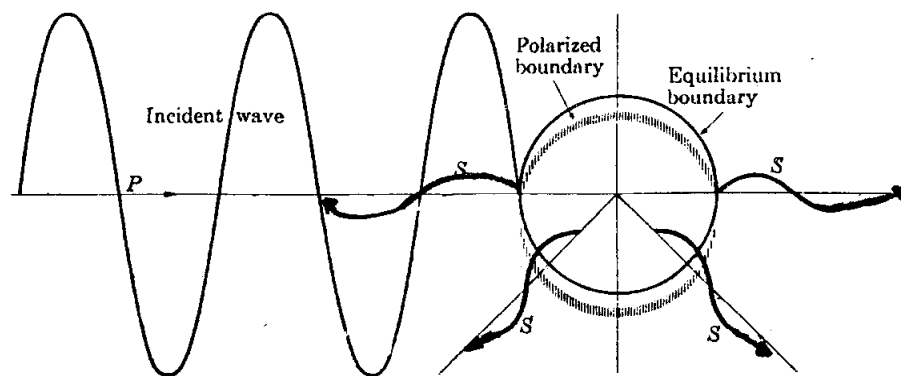
การปล่อยรังสี (Emission of Radiation) หรือการเปล่งรังสี

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากอนุภาคที่อยู่ในสถานะกระตุ้น (ไอออน อะตอมหรือโมเลกุล) กลับสู่สถานะพื้นที่มีพลังงานต่ำ การกระตุ้นทำได้หลายวิธี การระดมยิงด้วยอิเล็กตรอนหรืออนุภาคมูลฐาน การสปาร์คด้วยกระแสสลับที่มีศักย์สูง การให้ความร้อนโดยระบบเปลวไฟ (flame) หรือการอาร์ก (arc) หรือการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

อนุภาคที่ได้รับรังสี (มีพลังงานมาก) จะแยกตัวจากอนุภาคอื่น เช่น ในสถานะแก๊ส อนุภาคเหล่านี้มีความเป็นอิสระ จะปล่อยหรือเปล่งรังสีที่มีความยาวคลื่นจำเพาะไม่ที่ค่าสเปกตรัมที่ได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่องหรือสเปกตรัมเส้น (line spectrum) สเปกตรัมต่อเนื่อง (continuous spectrum) ได้จากอนุภาคปล่อยรังสีที่มีหลายความยาวคลื่นออกมา หรือปล่อยรังสีที่มีค่าใกล้เคียงกันออกมา สเปกตรัมต่อเนื่องเกิดจากการกระตุ้น (1) ของแข็งหรือของเหลวที่อะตอมจัดตัวใกล้กันและเป็นอิสระ (2) โมเลกุลที่ซับซ้อนที่มีระดับพลังงานอยู่ใกล้กัน สเปกตรัมต่อเนื่องยังเกิดเมื่ออนุภาคที่มีการเปลี่ยนพลังงานจลน์แบบไม่แน่นอน สเปกตรัมต่อเนื่องวิเคราะห์จากหลักการของอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสาร สเปกตรัมเส้นใช้วิเคราะห์คุณภาพ

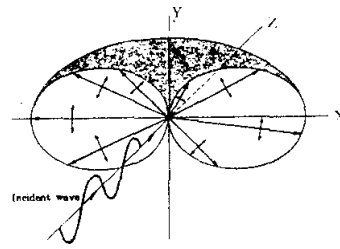
การปล่อย (เปล่ง) ครั้งที่สอง (Secondary Emission)

เมื่อมีรังสีที่มีสนามไฟฟ้าไม่คงที่ (เปลี่ยนแปลง) ชนสสาร อนุภาค โมเลกุล อะตอม หรือไอออน เวกเตอร์ไฟฟ้าจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในสสาร อนุภาคถูกโผลาไรส์ เช่น มีการเหนี่ยวนำชั่วคราว หรือกล่าวได้ว่าอนุภาคมีการแกว่งกวัดในเฟสเดียวกับรังสีที่ชน อย่างน้อยหนึ่งเฟส ดังรูป 2-14 สมมติความยาวคลื่นของรังสีที่ชนมีความยาวคลื่นไม่ตรงกับ ความยาวคลื่นที่สสารต้องการดูดกลืน ชั่วคราวในสสารที่มีการแกว่งกวัดจะให้รังสีชุดที่สองที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ ความยาวคลื่นของรังสีที่ชนออกมา จากทฤษฎีคลื่นเป็นอันตรกิริยา หรือการแทรกสอดของรังสีชุดที่สองกับรังสีที่ชน และทำให้เกิดปรากฏการณ์การหักเห การส่งผ่าน การสะท้อน และการกระเจิง



รูป 2-14 การแกว่งกวัดของชั่วคราวในอะตอมเมื่อมีรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวและโผลาไรส์ชนอะตอม ขนาดของความยาวคลื่นของรังสีที่ชนมีค่ามากกว่าขนาดของอะตอม คลื่น S เป็นคลื่นชุดที่สองที่ปล่อย (เปล่ง) ออกมา

รูป 2-15 ความสัมพันธ์ของรังสีชุดที่สองที่เปล่งออกมาจากขั้วคู่ที่มีการแกว่งกวัด ทำให้ได้กราฟความเข้มและการแผ่ การกระจายเชิงมุม



รูป 2-15 ความเข้มของลำรังสีชุดที่สองที่เปล่งออกมาจากขั้วคู่ที่มีการแกว่งกวัด อนุภาคเป็นแหล่งกำเนิดรังสี ของรูปโคไซน์แทนความเข้มที่ออกมาเช่น พื้นที่หน้าตัด XY เป็นความเข้มรังสีในทิศทางหนึ่ง และแปรโดยตรงกับความยาวคลื่น เวกเตอร์รังสีชุดที่สองเป็นแบบโพลาร์ไรส์เชิงเส้น

หมายเหตุ

- ก. ขนาด (แอมพลิจูด) สัมพัทธ์
- ข. รังสีชุดที่สอง เป็นรังสีโพลาร์ไรส์เชิงเส้น
- ค. ไม่มีรังสีในทิศทางตั้งฉากกับรังสีที่ชนออกมา ตัวกลางหรืออนุภาคที่อยู่ในสารที่มีค่าดัชนีหักเหมากมีโอกาสโพลาร์ไรส์ได้มาก ดังนั้น ขนาด (แอมพลิจูด) ของรังสีชุดที่สองที่เปล่งออกมามีค่ามาก

วัสดุที่มีผลทางกายภาพต่อรังสีมาก ได้แก่ ไดอิเล็กตริก หรือพวกที่ไม่ใช่ตัวนำ (nonconductor) วัสดุเหล่านี้มีอิเล็กตรอนหรือไอออนอิสระน้อยมากจึงยอมให้รังสีผ่านได้ดีของแข็งที่นำไฟฟ้าดีจะมีอิเล็กตรอนหรือไอออนอิสระทำหน้าที่ดูดกลืนหรือสะท้อนรังสีได้อย่างดี สารเหล่านี้จึงไม่น่าสนใจ วัสดุที่มีสมบัติไอโซทรอปิกเป็นวัสดุที่ยอมให้รังสีเดินทางเข้าไปในสารด้วยความเร็วเท่ากันทุกทิศทาง สารที่สมบัติแอนไอโซทรอปิกเป็นวัสดุที่ยอมให้รังสีเดินทางเข้าไปในสารในทิศทางหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกทิศทางหนึ่ง

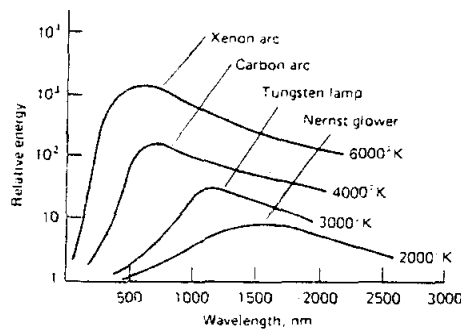
เมื่อมีรังสีผ่านจากตัวกลางไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งไปสู่ตัวกลางไดอิเล็กตริกอีกชนิดหนึ่ง รังสีบางส่วนถูกสะท้อนและถูกกระเจิง ในตัวกลางใหม่จะให้รังสีที่มีความเร็วและความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โดยรังสีจะมีทิศทางเปลี่ยนไปอย่างมาก บริเวณผิวหน้าระหว่างสองตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน จะมีการหักเห ถ้าผิวหน้าระหว่างสองตัวกลางมีค่าดัชนีหักเหต่างกันเล็กน้อย (สถานะนี้เกิดจากการที่มีอนุภาคจำนวนน้อยแขวนลอยอยู่บนอีกอนุภาคหนึ่ง) จะเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงมากกว่าการสะท้อน การกระเจิงเกิดขึ้นดีเมื่อขนาดของอนุภาคในตัวกลางเท่ากับความยาวคลื่นของรังสีที่ชน

รังสีความร้อน (Thermal Radiation)

เมื่อของแข็งได้รับความร้อนจะปล่อย (เปล่ง) รังสีแบบต่อเนื่องออกมา รังสีที่เปล่งออกมาขึ้นกับ อุณหภูมิของผิวของแข็งที่ได้รับความร้อนมากกว่าองค์ประกอบอื่นในของแข็ง รังสีนี้เรียก รังสีวัตถุดำ (black body radiation) เกิดจากอะตอมและโมเลกุลที่ได้รับพลังงานความร้อนจะเกิดการสั่นและอยู่ในสถานะกระตุ้นในสถานะของแข็งที่ควบแน่น รังสีที่ได้จากวัตถุดำมีสมบัติดังนี้

1. รังสีที่เปล่งออกมาจะมีความเข้ม (พลังงาน) ที่ความยาวคลื่นหนึ่งมากที่สุด และแปรผกผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์
2. พลังงานทั้งหมดของรังสีที่เปล่งออกโดยวัตถุดำ (ต่อหน่วยเวลาและพื้นที่) แปรโดยตรงกับอุณหภูมิกำลังสี่
3. กำลังรังสีที่เปล่งออกมาที่อุณหภูมิกำหนดให้แปรผกผันกับความยาวคลื่นยกกำลังห้า

รูป 2-16 รังสีที่ส่งออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (วัตถุดำ) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจะได้ รังสีที่มีความยาวคลื่นสั้น (อัลตราไวโอเล็ต) รังสีที่ได้จากวัตถุดำ ได้แก่ อินฟราเรด วิสิเบิล และอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นมากได้จากการให้ความร้อนของแข็ง



รูป 2-16 เคอร์ฟความเข้มของรังสี (พลังงาน) ที่ได้จากวัตถุดำ

การเปล่งของแก๊ส (Emission of Gases)

อะตอม ไอออน หรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สถูกกระตุ้นได้ง่ายโดยการดิสราร์จด้วยไฟฟ้าหรือความร้อน จะให้รังสีช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล กระบวนการนี้เกิดจากอิเล็กตรอนวงนอกสุดของสปีชีส์เมื่อได้รับพลังงานจะเปลี่ยนไปสู่สถานะกระตุ้นอิเล็กตรอนิกส์ สปีชีส์ที่อยู่ในสถานะนี้ไม่เสถียรจะปล่อยพลังงานออกมาและกลับสู่สถานะพื้นพร้อมกับให้สเปกตรัมออกมา

สเปกตรัมต่อเนื่องได้จากโมเลกุลของแก๊สที่อยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น ไฮโดรเจน หรือดีวเทอเรียมที่ความดันต่ำเมื่อได้รับการดิสซาร์จด้วยไฟฟ้า โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะเกิดการแตกตัว (dissociate) ให้ไฮโดรเจนอะตอมสองอะตอมกับโฟตอนชนิดอัลตราไวโอเล็ต พลังงานของกระบวนการนี้เขียนเป็นสมการได้

$$E_{H_2} = \epsilon_{H_1} + \epsilon_{H_2} + h\nu$$

E_{H_2} แทนพลังงานของโมเลกุลไฮโดรเจนที่ถูกกระตุ้น ϵ_{H_1} และ ϵ_{H_2} แทนพลังงานจลน์ของอะตอม ผลรวมของตัวหลัง ($h\nu$) แปรได้จาก 0 ถึง E_{H_2} $h\nu$ แปรได้อย่างต่อเนื่องในช่วง (400 ถึง 200 นาโนเมตร) จึงใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตทางสเปกโทร

การปล่อยรังสีเอกซ์ (Emission of X-ray Radiation)

รังสีเอกซ์เกิดจากการระดมยิงเป้าโลหะด้วยอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง ถ้าอิเล็กตรอนนี้ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่สูงสุดในสุดของอะตอมของวัสดุที่ใช้เป็นเป้า (target) มีพลังงานสูงขึ้นและหลุดออกมา อะตอมหรือไอออนที่ถูกกระตุ้นจะกลับสู่สถานะพื้นโดยการทรานซิชันทางอิเล็กตรอนิกส์จากอิเล็กตรอนวงนอกพร้อมกับปล่อยโฟตอนที่มีพลังงาน $h\nu$ ออกมา การทรานซิชันนี้เกิดจากอิเล็กตรอนวงนอกวิ่งเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนวงในพร้อมกับปล่อยพลังงานออกมา สเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่ได้ขึ้นกับสมบัติของเป้า สเปกตรัมนี้มีพลังงานจำเพาะและถูกทับด้วยรังสีต่อเนื่อง (พลังงานหลายค่าอยู่ด้วยกัน) พลังงานนี้ได้จากอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง ค่อย ๆ ลดความเร็วลงขณะที่ผ่านชั้นอิเล็กตรอนต่าง ๆ เพื่อเข้าไปชนอิเล็กตรอนวงในสุดของเป้า

ฟลูออเรสเซนซ์และฟอสฟอเรสเซนซ์

(Fluorescence and Phosphorescence)

อะตอมหรือโมเลกุลเมื่อได้รับพลังงานจากการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในสถานะกระตุ้นซึ่งไม่เสถียร อะตอมหรือโมเลกุลนี้จะปล่อยรังสีออกมาขณะที่อะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นกลับสู่สถานะพื้น รังสีที่เปล่งออกมาอาจเป็นการวาวแสง (ฟลูออเรสเซนซ์) และการเรืองแสง (ฟอสฟอเรสเซนซ์) ฟลูออเรสเซนซ์เกิดเร็วกว่าฟอสฟอเรสเซนซ์มาก การเกิดฟลูออเรสเซนซ์ใช้เวลาประมาณ 10^{-8} วินาทีหรือน้อยกว่านี้หลังจากเกิดการกระตุ้น ความเข้มฟลูออเรสเซนซ์และฟอสฟอเรสเซนซ์มีค่าสูงสุดที่มุม 90 องศากับรังสีที่กระตุ้น ฟอสฟอเรสเซนซ์ใช้เวลานานกว่า 10^{-5} วินาที อาจเป็นนาทีหรือชั่วโมงหลังจากการกระตุ้น

เรโซแนนซ์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นกระบวนการที่รังสีที่เปล่งออกมามีความถี่เท่ากับรังสีที่ใช้กระตุ้น เส้น 1 และ 2 ในรูป 2-13 (ก) และ 2-13 (ค) แทนเรโซแนนซ์ฟลูออเรสเซนซ์ สปีซีที่ถูกกระตุ้นจนมีพลังงาน E_1 หรือ E_2 หลังจากอยู่ที่สถานะนี้ชั่วครู่จะกลับสู่สถานะพื้น โดยให้รังสีที่มีพลังงานเท่ากับ $E_1 - E_0$ หรือ $E_2 - E_0$ สปีซีที่ให้เรโซแนนซ์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นอะตอมที่ไม่มีระดับพลังงานการสั่นใกล้กับระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์

สปีซีที่ให้แอร์แมลฟลูออเรสเซนซ์ (นอนเรโซแนนซ์ฟลูออเรสเซนซ์) เป็นอะตอมที่มีระดับพลังงานใกล้เคียงกับระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสสารละลายหรือในสถานะแก๊สดูดกลืนรังสี อะตอมนี้จะถูกกระตุ้นไปสู่สถานะกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์ E_1 หรือ E_2 และอยู่ที่ระดับพลังงานการสั่นมากกว่า 0 ช่วงชีวิตของอะตอมที่สถานะกระตุ้น E_1 หรือ E_2 ที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่าศูนย์สั้นมาก (10^{-15} วินาที) จะเกิดการผ่อนคลายโดยการสั่น (Vibrational relaxation) โดยการถ่ายโอนพลังงานให้กับตัวทำละลายชนิดไม่ให้รังสี แล้วกลับสู่สถานะกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์ E_1 หรือ E_2 ที่มีระดับพลังงานการสั่นเท่ากับศูนย์ ช่วงชีวิตของอะตอมที่สถานะนี้มีค่าน้อย 10^{-8} วินาที (ยาวกว่าสถานะกระตุ้น E_1 หรือ E_2 ที่มีระดับการสั่นมากกว่าศูนย์) จะกลับสู่สถานะพื้น E_0 โดยการเปล่งรังสีที่มีพลังงาน $E_1 - E_0$ หรือ $E_2 - E_0$ น้อยกว่าพลังงานของรังสีที่ดูดเข้าไป $\{E_1 + e'_{14} - (E_0 + e_0)\}$ หรือ $\{E_2 + e'_{24} - (E_0 + e_0)\}$ รังสีที่เปล่งออกมาจึงมีความถี่น้อยกว่าความถี่ของรังสีที่ดูดเข้าไป บางทีเรียกการเลื่อนสโตก

ฟอสฟอเรสเซนซ์เกิดจากโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นซึ่งเปลี่ยนเป็นสถานะกระตุ้นทริเพิลต์ ซึ่งมีช่วงชีวิตยาวกว่า 10^{-5} วินาที หลังจากนั้นกลับสู่สถานะพื้นโดยเปล่งรังสีฟอสฟอเรสเซนซ์ออกมา

แบบฝึกหัด

- 2-1. จงคำนวณความถี่เป็นเฮิรตซ์และเลขคลื่นของ
- ก. ลำรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น 2.7 อังสตรอม
 - ข. เส้นสเปกตราที่ปล่อยออกมาจากทองแดงที่ 211.0 นาโนเมตร
 - ค. เส้นสเปกตราที่ปล่อยออกมาจากรูบีเลเซอร์ที่ 694.3 นาโนเมตร
 - ง. สเปกตราของคาร์บอนไดออกไซด์แก๊สเลเซอร์ที่ 10.6 ไมโครเมตร
 - จ. พิคคูดกลืนอินฟราเรดที่ 14.7 ไมโครเมตร
 - ฉ. ลำไมโครเวฟที่มีความยาวคลื่น 1.86 เซนติเมตร
- 2-2. จงคำนวณความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตรของ
- ก. ความถี่วิทยุของหอคอยท่าอากาศยานที่มีความถี่ 119.3 เมกะเฮิรตซ์
 - ข. สัญญาณจากคลื่นวิทยุความถี่ 327.4 กิโลเฮิรตซ์
 - ค. สัญญาณเอนเอ็มอาร์ ความถี่ 10.1 เมกะเฮิรตซ์
 - ง. สัญญาณอีพีอาร์ ความถี่ 9500 เมกะเฮิรตซ์
- 2-3. จงคำนวณพลังงานของรังสีแต่ละชนิดจากข้อ 1
- ก. เอิร์กต่อโฟตอน
 - ข. กิโลแคลอรีต่อโมล
 - ค. อิเล็กตรอนโวลต์
- 2-4. จงคำนวณพลังงานของรังสีแต่ละชนิดจากข้อ 2
- ก. เอิร์กต่อโฟตอน
 - ข. กิโลแคลอรีต่อโมล
 - ค. อิเล็กตรอนโวลต์
- 2-5. จงคำนวณความเร็ว ความยาวคลื่น และความถี่ของโซเดียม เส้น D (ความยาวคลื่น 5890 อังสตรอมในสุญญากาศ) ใน
- ก. คลอโรฟอร์ม ($n_D = 1.0014$)
 - ข. คลอโรฟอร์ม ($n_D = 1.4459$)
 - ค. แก้วฟลินต์ทึบ ($n_D = 1.890$)
 - ง. โพลีสเตียมคลอไรด์ 3 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ($n_D = 1.360$)
- 2-6. จงคำนวณการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสะท้อนของลำรังสีที่มีความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร

ก. ผ่านแก้วฟลินต์ทึบ ($n_D = 1.59$)

ข. ผ่านเซลล์ที่มีหน้าต่างเป็นแก้ว ($n_D = 1.46$) ภายในเซลล์มีสารละลายแอลกอฮอล์ที่มีดัชนีหักเห 1.32
